



⑬ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ Offenlegungsschrift  
⑩ DE 199 35 918 A 1

⑤ Int. Cl. 7:  
B 64 D 13/06

⑲ Aktenzeichen: 199 35 918.0  
⑳ Anmeldetag: 30. 7. 1999  
㉑ Offenlegungstag: 8. 2. 2001

DE 199 35 918 A 1

⑦ Anmelder:  
Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH, 88161  
Lindenberg, DE  
  
⑧ Vertreter:  
Rechts- und Patentanwälte Lorenz Seidler Gossel,  
80538 München

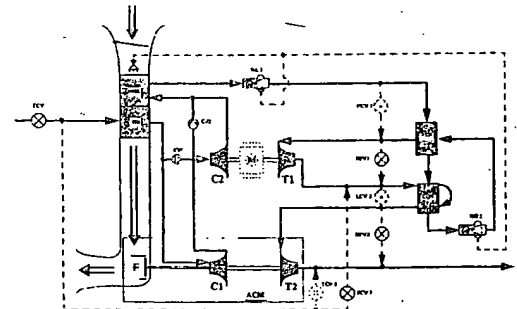
⑦ Erfinder:  
Sauterleute, Alfred, 88178 Heimenkirch, DE

⑤⑤ Entgegenhaltungen:  
EP 08 88 966 A2  
WO 99 24 318 A1  
WO 99 02 400 A1  
WO 99 02 399 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

- ⑤④ Klimatisierungssystem für Flugzeugkabinen  
⑤⑦ Es wird ein Klimatisierungssystem insbesondere für Luftfahrzeuge vorgeschlagen, bei dem unter Überdruck stehende, Feuchtigkeit enthaltende Luft zur Klimatisierung der Kabine aufbereitet wird. Dabei wird die unter Überdruck stehende Luft in zwei separaten Stufen weiter verdichtet, in einem Hochdruckwasserabschleidekreislauf entfeuchtet und anschließend in einer oder zwei Turbinenstufen entspannt. Je nach Auslegung kann damit eisfreie klimatisierte Luft oder ein hoher Wirkungsgrad des Klimatisierungssystems erzielt werden, insbesondere wenn zwei Turbinenstufen vorgesehen sind und die in den Turbinenstufen jeweils gewonnene Energie auf die Verdichterstufen verteilt regenerativ genutzt wird.



DE 199 35 918 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Klimatisierungssystem zum Aufbereiten von Feuchtigkeit enthaltender, unter Überdruck stehender Luft zur Klimatisierung eines Raumes, insbesondere zur Klimatisierung von Flugzeugkabinen, und ein entsprechendes Verfahren.

Die Frischluft zur Klimatisierung von Flugzeugkabinen wird aus der dem Triebwerk mit hohem Druck und hoher Temperatur abgezapften Luft, der sogenannten Zapfluft, aufbereitet. Die Klimatisierungssysteme ziehen die dazu erforderliche Kühlleistung aus dem Druck- und Temperaturpotential der Triebwerksluft. Die Zapfluft wird im Laufe des Frischluftaufbereitungsprozesses abgekühlt, entfeuchtet und auf den Kabinendruck von 1 bar im Bodenbetrieb bzw. etwa 0,8 bar im Flugbetrieb entspannt. Besonderer Wert wird bei der Frischluftaufbereitung auf die Luftentfeuchtung gelegt, um eine Vereisung einzelner Bestandteile des Klimatisierungssystems und eine Eiskristallbildung in der aufzubereitenden Frischluft zu verhindern. Die Notwendigkeit der Entfeuchtung besteht allerdings hauptsächlich im Bodenbetrieb, weil im Flugbetrieb, d. h. in großen Höhen, die Umgebungsluft und damit die abgezapfte Triebwerksluft ohnehin extrem trocken ist.

Anhand Fig. 4 wird nachfolgend ein Klimatisierungssystem beschrieben, wie es in den heutigen Passagierflugzeugen von Airbus und Boeing, beispielsweise dem A330/340 und Boe 757/767, eingesetzt wird.

Über ein Durchsatzregelventil FCV ("Flow Control Valve") wird diejenige Menge Zapfluft ("Bleed") aus einem Triebwerk mit etwa 2 bar und 200°C abgezapft, die zur Frischluftversorgung für die Kabine benötigt wird. Im Bodenbetrieb wird die Zapfluft einem Hilfstriebwerk mit etwa 3 bar entzogen. Die Zapfluft wird zunächst durch einen Primärwärmetauscher PHX ("Primary Heat Exchanger") geleitet und auf ca. 100°C abgekühlt. Dann wird die Zapfluft in einem Verdichter C ("Compressor") weiter verdichtet auf ca. 4,5 bar und 160°C und in einem Hauptwärmetauscher MHX ("Main Heat Exchanger") wieder abgekühlt auf ca. 45°C. Der hohe Druck von 4,5 bar ist erforderlich, um in dem nachfolgenden Wasserabscheidekreislauf einen hohen Entfeuchtungsgrad realisieren zu können. Dieses Air Cycle System ist daher auch als "Hochdruckwasserabscheidekreislauf" bekannt.

Der Hochdruckwasserabscheidekreislauf umfaßt einen Kondensator CON ("Condensor"), wie er in EP 0 019 493 A3 vorgeschlagen ist, und einen dem Kondensator CON nachgeschalteten Wasserabscheider WE ("Water Extractor"). Die komprimierte, gekühlte Zapfluft wird in dem Kondensator CON um etwa  $\Delta T = -15$  K abgekühlt, das kondensierte Wasser wird dann im Wasserabscheider WE abgeschieden, und anschließend wird die so entfeuchtete Luft in einer Turbine T auf den Kabinendruck von etwa 1 bar entspannt, wobei die Temperatur am Turbinenausgang etwa -30°C beträgt. Die so aufbereitete Zapfluft wird, noch bevor sie als Frischluft in einer Mischkammer mit rezirkulierter Kabinenluft vermengt wird, in wärmetauschender Weise durch den Kondensator CON des Hochdruckwasserabscheidekreislaufs geleitet, um die komprimierte, gekühlte Zapfluft auf die zur Wasserabscheidung im Wasserabscheider WE notwendige Temperatur abzukühlen. Dabei erwärmt sich die in der Turbine T entspannte und gekühlte Luft wieder entsprechend um  $\Delta T = +15$  K auf etwa -15°C.

Die klimatisierte Luft wird dann in einer nicht dargestellten Mischkammer mit rezirkulierter Kabinenluft gemischt. Mittels eines Temperaturregelventils TCV kann die Temperatur am Turbinenausstritt erhöht werden, um eine optimale

Mischtemperatur mit der zugemischten, rezirkulierten Kabinenluft zu erhalten. Zu diesem Zweck wird von der im Vorwärmetauscher PHX vorgekühlten Zapfluft ein Teil abgezweigt und hinter der Turbine T dem aufbereiteten Luftstrom wieder zugeführt.

Im dem Hochdruckwasserabscheidekreislauf ist zusätzlich zu dem Kondensator CON ein dem Kondensator CON vorgeschalteter Wärmetauscher REH ("Reheater") vorgesehen. Durch den Wärmetauscher REH wird zunächst die komprimierte, gekühlte Zapfluft geleitet, bevor sie in den Kondensator CON eintritt, und anschließend wird durch den Wärmetauscher REH die entfeuchtete Luft geleitet, bevor sie in die Turbine T eintritt. Der Wärmetauscher REH hat dabei im wesentlichen die Aufgabe, die entfeuchtete Luft um etwa  $\Delta T = 5$  K zu erwärmen und Restfeuchte bei gleichzeitiger Energierückgewinnung zu verdampfen, bevor die Luft in die Turbine eintritt. Denn Restfeuchte in Form von feinen Tröpfchen kann die Turbinenoberflächen zerstören, da die Luft in der Turbine T nahezu Schallgeschwindigkeit erreicht. Eine zweite Funktion des Wärmetauschers REH besteht darin, den Kondensator CON zu entlasten, indem die komprimierte, gekühlte Zapfluft vor Eintritt in den Kondensator CON um entsprechend  $\Delta T = -5$  K gekühlt wird.

Typisch für ein solches Klimatisierungssystem ist, daß die in der Turbine T gewonnene Energie dazu benutzt wird, einerseits den Verdichter C und andererseits ein Gebläse F ("Fan") anzutreiben. Alle drei Räder, das heißt Turbine/Verdichter/Gebläse, sind auf einer gemeinsamen Welle angeordnet und bilden die Air Cycle Machine ACM, die auch als Drei-Rad-Maschine bezeichnet wird. Das Gebläse F fördert einen aus der Umgebungsluft abgezweigten Kühlluftstrom durch einen Kühlschacht, in dem die Primär- und Hauptwärmetauscher PHX, MHX angeordnet sind. Das Gebläse F muß insbesondere im Bodenbetrieb aktiv durch die Turbine T angetrieben werden. Im Flugbetrieb reicht die Stauluft aus, die gegebenenfalls durch eine Klappe am Kühlschachteintritt gedrosselt werden kann.

Das Gesamtsystem ist für den Bodenbetrieb bei einer Umgebungstemperatur von 38°C ausgelegt. Um die Effektivität des Wärmetauschprozesses im Kühlschacht zu optimieren, wird das im Hochdruckwasserabscheidekreislauf gewonnene Wasser mit einer Temperatur von ca.  $T = 20$ °C und einem Druck von 3,5 bar im Kühlschachteintritt in feinen Tröpfchen zur dortigen Verdampfung zugeführt, wodurch die Effektivität der Wärmetauscher verbessert wird.

Für den Fall, daß die Air Cycle Machine ACM vollständig ausfällt, weil zum Beispiel der notwendige Druckluftmassenstrom nicht erreichbar ist, um die für das Funktionieren des Systems erforderlichen Parameter zu erfüllen, ist ein Bypassventil BPV ("bypass valve") vorgesehen, um die Turbine T zu umgehen. In diesem Falle öffnet automatisch ein Überlastventil CV ("check valve"), indem sich vor dem Verdichter C mangels Antriebs durch die Turbine T ein das Überlastventil CV auslösender Überdruck aufbaut. Durch Öffnung des Überlastventils CV wird der Verdichter C umgangen bzw. "kurzgeschlossen". In diesem Zustand wird die Frischluft unmittelbar durch Vor- und Hauptwärmetauscher PHX, MHX direkt der dem Klimatisierungssystem nachgeschalteten Mischkammer zum Mischen mit rezirkulierter Kabinenluft zugeführt.

Wie eingangs erwähnt, stellt die Eisbildung in der aufbereiteten Frischluft ein Problem dar. Um die Eisbildung zu vermeiden, ist ein Enteisungsventil AIV ("anti icing valve") vorgesehen, mit dem unmittelbar von der dem Triebwerk abgezapften Luft ein Teil abgezweigt und hinter der Turbine T dem aufbereiteten Luftstrom wieder zugeführt wird. Eine weitere Möglichkeit zur Eisvermeidung besteht darin, die Turbine so ausulegen, daß am Turbinenausstritt keine Tem-

peraturen unter 0°C auftreten. Diese letztere Variante erfordert jedoch wesentlich mehr Energie, wenn dieselbe Kühlleistung erreicht werden soll. Daher wird die Warmluftzuführung am Turbinenausgang bevorzugt.

Eine verbesserte Variante dieses Klimatisierungssystems sieht vor, daß die Air Cycle Machine ACM um eine zweite Turbine erweitert wird. Aus der Drei-Rad-Maschine Turbine/Verdichter/Gebläse wird dadurch eine Vier-Rad-Maschine Turbine/Turbine/Verdichter/Gebläse (US 5,086,622). Die zweite Turbine ist mit den übrigen Rädern auf einer gemeinsamen Welle angeordnet, um wie bei dem herkömmlichen Drei-Rad-System die durch die Turbinen gewonnene Energie in das Klimatisierungssystem zurückzuführen. Die zweite Turbine ergänzt die erste Turbine derart, daß die im Hochdruckwasserabscheidekreislauf entfeuchtete Luft in zwei Stufen entspannt wird, wobei der Kondensator des Hochdruckwasserabscheidekreislaufs in wärmetauschender Weise mit der Luftleitung zwischen den beiden Turbinen angeordnet ist. Dies ist energetisch günstiger als der herkömmliche Aufbau des Klimatisierungssystems, weil die aus der ersten Turbine austretende Luft vergleichsweise warm ist, zur Eisvermeidung vorzugsweise über 0°C, und diese Luft in dem Kondensator CON um beispielsweise  $\Delta T = +15$  Kelvin auf ein vergleichsweise hohes Energieniveau aufgewärmt wird, so daß die zweite Turbine dieses hohe Energieniveau zur Energiegewinnung nutzen kann, die bei dem herkömmlichen System verlorengeht. In Fachkreisen ist dieses System als "condensing-cycle" bekannt.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, das zuvor beschriebene Klimatisierungssystem bzw. -verfahren so anzupassen, daß es flexibler ausgelegt werden kann und der Gesamtwirkungsgrad einfacher zu optimieren ist, insbesondere daß es durch eine größere Anzahl frei wählbarer Systemparameter flexibler und daher energetisch besser an die jeweiligen Systemanforderungen adaptierbar ist.

Eine weitere Aufgabe ist es, ein Klimatisierungssystem und -verfahren zu schaffen, mit dem die Eisbildung bei der Luftaufbereitung verringert werden kann.

Eine weitere Aufgabe besteht darin, den Gesamtwirkungsgrad gegenüber den bekannten Systemen und Verfahren zu verbessern.

Außerdem ist eine weitere Aufgabe darin zu sehen, den Gesamtwirkungsgrad insbesondere im Flugbetrieb zu erhöhen.

Diese Aufgaben werden durch das Klimatisierungssystem und Verfahren mit den in den nebengeordneten Patentansprüchen und davon abhängigen Ansprüchen angegebenen Merkmalen gelöst.

Wesentlich für die Erfindung ist, daß die Verdichtung der Zapfluft in zwei Stufen erfolgt. Eine der beiden Verdichtungsstufen bezieht die zur Verdichtung benötigte Energie auf herkömmliche Weise durch regenerative Nutzung der Energie, die beim Entspannen der entfeuchteten Luft gewonnen wird. Dazu ist beispielsweise eines der beiden Verdichterräder mit einem Turbinenrad auf einer gemeinsamen Welle angeordnet, so daß Verdichterrad und Turbinenrad gegebenenfalls zusätzlich mit einem Lüfterrad eine (erste) zwei- oder dreirädrige Air Cycle Machine bilden. Vorzugsweise ist das Verdichterrad der ersten Verdichtungsstufe mit dem Turbinenrad auf einer gemeinsamen Welle angeordnet, es kann aber auch das Verdichterrad der zweiten Verdichtungsstufe sein. Das andere Verdichterrad kann beispielsweise mit systemfremder Energie angetrieben werden. Dadurch ist es möglich, die (erste) Air Cycle Machine so ausulegen, daß die auf gemeinsamer Welle angeordneten Verdichter und Turbine einen vergleichsweise hohen Wirkungsgrad haben. Dies führt zunächst dazu, daß die Verdichterleistung der Air Cycle Machine unter der Verdichterleistung liegt, die not-

wendig wäre, um die aufzubereitende Triebwerkluft auf den zur Luftentfeuchtung notwendigen Druck zu bringen. Die noch fehlende Verdichterleistung wird deshalb durch die zusätzliche Verdichterstufe zur Verfügung gestellt. Dadurch läßt sich das Klimatisierungssystem flexibel auslegen und der Gesamtwirkungsgrad ist einfach zu optimieren.

Aufgrund der zweiten Verdichterstufe ist es insbesondere möglich, eisfreie klimatisierte Luft zu erzeugen. Dabei macht sich die Erfindung zunutze, daß sich bei vorgegebener Temperatur mit steigendem Druck die Menge des aus der Luft kondensierenden Wassers erhöht. Da die Temperatur systembedingt nur in Grenzen beeinflussbar ist, insbesondere weil die im Hauptwärmetauscher abgekühlte, verdichtete Triebwerkluft in dem Kühlschacht nicht unter die Umgebungstemperatur abgekühlt werden kann (Auslegung für 38°C Umgebungstemperatur), kann mit der zusätzlichen Verdichterstufe ein vergleichsweise hoher Verdichtungsdruck von  $\geq 4,6$  bar erzeugt werden, um den gewünschten, hohen Kondensationsgrad im Hochdruckwasserabscheidekreislauf zu erreichen. Eisfreiheit wird z. B. bei -10°C und 1 bar mit  $< 1,8$  g Wasser pro Kilogramm trockener Luft erreicht.

Anstelle einer systemfremden Energiequelle für den zusätzlichen Verdichter kann dieser auch regenerativ betrieben werden, indem nicht nur die Verdichtung der Zapfluft, sondern auch die Entspannung der entfeuchteten Luft zweistufig erfolgt, beispielsweise in zwei separaten Turbinen, und die von den Turbinen gelieferte Energie einerseits für die erste und andererseits für die zweite Verdichterstufe genutzt werden. Das Klimatisierungssystem umfaßt dann zwei Maschinen, die jeweils mindestens ein Verdichterrad und ein Turbinenrad auf gemeinsamer Welle besitzen. Zusätzlich können auf einer Welle das Gebläse und auf der anderen Welle ein Motor angeordnet sein, wobei der Motor auch als Generator ausgelegt sein kann.

Die Anordnung der Verdichter- und Turbinenräder auf zwei separaten Wellen bzw. in zwei separaten Maschinen lassen eine wesentlich flexiblere Auslegung des Gesamtsystems als herkömmliche Klimatisierungssysteme zu. Eine optimale Auslegung insbesondere von Verdichter und Turbine ist gegeben.

Eisfreiheit kann insbesondere dann problemlos erreicht werden, wenn nicht nur die Verdichtung der Zapfluft sondern auch die Kondensierung der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeit im Hochdruckwasserabscheidekreislauf zweistufig erfolgt. Dazu ist ein erster Kondensator des Hochdruckwasserabscheidekreislaufs zum Wärmetausch mit der entfeuchteten Luft vor Eintritt in die Turbine, bei zweistufiger Entspannung vor Eintritt in die zweite Turbine, und ein zweiter Kondensator des Hochdruckwasserabscheidekreislaufs zum Wärmetausch mit der entfeuchteten und entspannten Luft nach Austritt aus der Turbine angeordnet, wobei die verdichtete Luft in wärmetauschender Weise durch diese Kondensatoren geleitet wird, um Wasser zu kondensieren und nachfolgend abzuschneiden. Die Effektivität der Entfeuchtung wird durch die zweistufige Kondensation wesentlich erhöht. Dies gilt insbesondere, wenn auch die Entspannung zweistufig in zwei Turbinenstufen erfolgt.

Wo geringe Mengen Eis in der Kühlluft kein größeres Problem darstellen, sondern ein hoher Wirkungsgrad des Gesamtsystems im Vordergrund steht, ist es vorteilhaft, die zweistufige Verdichtung mit einer zweistufigen Entspannung zu kombinieren, wobei die verdichtete Luft zum Abscheiden der Feuchtigkeit in wärmetauschender Weise durch einen Kondensator geleitet wird, der zwischen einer ersten und einer zweiten Turbine angeordnet ist. Der Wirkungsgrad kann darüber hinaus weiter verbessert werden, wenn die entfeuchtete Luft vor Eintritt in die erste Turbinen-

stufe in wärmetauschender Weise in einem "Reheater" an der verdichteten, noch nicht entfeuchteten Luft vorbeigeführt wird. Dadurch wird einerseits der Kondensator entlastet, indem die verdichtete Luft vor Eintritt in den Kondensator vorgekühlt wird. Andererseits wird etwaige, in der entfeuchteten Luft enthaltene Restfeuchte vor Eintritt in die erste Turbine verdampft, so daß die Turbinenoberflächen vor Zerstörung durch Wassertropfen geschützt sind. Vom Wirkungsgrad her ist diese Variante am günstigsten einzustufen.

Die Erfindung bietet den weiteren Vorteil, daß durch geeignete Bypass-Schaltungen eine Abschaltung der zusätzlichen Verdichterstufe und gegebenenfalls der diese Verdichterstufe antreibenden Turbinenstufe möglich ist. Dies ist insbesondere im Flugbetrieb sinnvoll, wo Luftfeuchtigkeit und Eisfreiheit der Kühlluft keine Rolle spielen, eine hohe Verdichtung für den Hochdruckwasserabschidekreislauf also nicht erforderlich ist. Im Flugbetrieb kann dann eine der beiden Maschinen durch Öffnen und/oder Schließen von Ventilen vollständig abgeschaltet werden, wodurch unnötige Verluste vermieden und demzufolge der Wirkungsgrad im Flugbetrieb erhöht werden kann.

Die Ausbildung des Klimatisierungssystems mit zwei voneinander getrennten Maschinen umfassend jeweils Verdichter und Turbinenrad auf gemeinsamer Welle, von denen eine im Flugbetrieb abgeschaltet werden kann, bietet weitere Vorteile, die daraus resultieren, daß systembedingt im Bodenbetrieb ein größeres Druckverhältnis zur Verfügung steht als im Flugbetrieb. Dadurch ist es energetisch günstig, im Bodenbetrieb eine relativ kleine Turbinennozzle (Leitgitterquerschnitt) vorzusehen. Diese kleine Nozzle wird durch Hintereinanderschalten der beiden Turbinenstufen realisiert, wobei sich eine "Gesamtnozzle" ergibt, die kleiner ist als jede einzelne Nozzle. Im Flugbetrieb wird aber trotz eines geringeren, zur Verfügung stehenden Druckverhältnisses etwa derselbe Volumenstrom zur Klimatisierung der Flugzeugkabine benötigt, so daß im Flugbetrieb eine große Nozzle für etwa denselben Luftdurchsatz notwendig wäre. Indem im Flugbetrieb eine Maschine und damit eine Turbinenstufe für das Gesamtsystem ausgeschaltet wird, ergibt sich aufgrund der allein verbliebenen Turbine der zweiten Turbinenstufe für das Gesamtsystem eine große Nozzle. Dadurch kann also der Wirkungsgrad im Flugbetrieb erhöht werden. Dieser Gewinn an Wirkungsgrad wird vorzugsweise dazu genutzt, den Primär- und Hauptwärmetauscher mit möglichst geringer Baugröße und Gewicht zu gestalten unter der Randbedingung, daß die erforderliche Volumendurchflußmenge gerade noch erfüllt wird. Im Endeffekt kann also durch die Maßnahme, statt nur einer Maschine zwei Maschinen vorzusehen, eine geringere Baugröße und damit ein geringeres Gesamtgewicht des Klimatisierungssystems erreicht werden.

Ein weiterer Vorteil, der sich ergibt, wenn das Klimatisierungssystem zwei getrennte Maschinen mit jeweils gekoppeltem Verdichter und Turbine besitzt, besteht darin, daß bei Ausfall einer Maschine zumindest die andere Maschine noch funktioniert und das Klimatisierungssystem uneingeschränkt weiter betrieben werden kann. Bei der für Luftfahrzeuge geforderten Redundanz führt dies dazu, daß ein Klimagerät ("Pack") weniger pro Luftfahrzeug notwendig ist, beispielsweise anstelle von drei Packs nur noch zwei Packs. Dies hat zur Konsequenz, daß aufgrund der entsprechend gesunkenen Anzahl von Bauteilen das Gewicht sinkt, die Zuverlässigkeit der Anlage steigt und der Aufwand für Wartung und Reparatur reduziert wird.

Schließlich ist festzustellen, daß sowohl im Bodenbetrieb mit zwei Maschinen als auch im Flugbetrieb mit einer abgeschalteten Maschine die bei der Entspannung in der/den

Turbinen gewonnene Energie über die beiden Verdichterstufen (Bodenbetrieb) oder die allein verbleibende Verdichterstufe (Flugbetrieb) jeweils weitgehend zurückgewonnen wird.

Nachfolgend wird die Erfindung beispielhaft anhand der Fig. 1 bis 3 beschrieben. Darin zeigen:

Fig. 1 ein Schema zu einem erfindungsgemäßen Klimatisierungssystem,

Fig. 2 ein Schema einer verbesserten Ausführungsform des Systems aus Fig. 1; insbesondere zur Erzeugung von eisfreier klimatisierter Luft,

Fig. 3 ein Schema einer verbesserten Ausführungsform des Systems aus Fig. 1 mit verbessertem Wirkungsgrad und

Fig. 4 ein Klimatisierungssystem nach dem Stand der Technik.

Fig. 1 zeigt ein Klimatisierungssystem, das sich von dem in Fig. 4 in Bezug auf den Stand der Technik beschriebenen Klimatisierungssystem im wesentlichen dadurch unterscheidet, daß zwei Verdichter C1 und C2 vorgesehen sind, um die im Primärwärmetauscher PHX gekühlte Zapfluß auf den zur Hochdruckwasserabscheidung erforderlichen Druck zu bringen. Die Verdichter C1 und C2 sind je nachdem, ob Eisfreiheit oder hoher Wirkungsgrad des Klimatisierungssystems im Vordergrund stehen, auszulegen. In Fig. 1 bilden der Verdichter C1 der ersten Verdichterstufe zusammen mit der Turbine T und dem Gebläse F eine Drei-Rad-Maschine ACM. Das heißt, Verdichter C1 und Gebläse F werden durch die in der Turbine T gewonnene Energie regenerativ angetrieben. Der Verdichter C2 der zweiten Verdichtungsstufe wird durch einen separaten Motor M, das heißt durch Fremdenergie, betrieben. Das Überlastventil CV2 öffnet automatisch, wenn der Verdichter C2 blockiert oder wenn Motor M des Verdichters C2 beispielsweise im Flugbetrieb nicht abgeschaltet wird. Das Überlastventil CV1 öffnet automatisch, wenn die Air Cycle Machine ACM blockiert oder das Bypassventil BPV2 aktiv geöffnet wird.

Im übrigen entspricht prinzipiell das in Fig. 1 schematisch dargestellte Klimatisierungssystem in Aufbau und Funktion dem System von Fig. 4, wobei zu berücksichtigen ist, daß der Reheater nicht unbedingt erforderlich ist, aber insbesondere für den Fall, daß absolute Eisfreiheit erzielt werden soll, von großem Vorteil ist.

In Fig. 2 ist eine weitere Ausgestaltung der Erfindung dargestellt. In dem dort schematisch dargestellten Klimatisierungssystem wird die entfeuchtete Luft zweistufig über Turbinen T1 und T2 entspannt. Die bei der Entspannung in Turbine T1 gewonnene Energie wird regenerativ zum Antrieb des Verdichters C2 genutzt, während die von der Turbine T2 gelieferte Energie, wie zuvor, regenerativ vom Verdichter C1 genutzt wird. Zusätzlich zu dem Kondensator CON1 im Hochdruckentwässerungskreislauf, durch den in wärmetauschender Weise die verdichtete Zapfluß an der in der Turbine T1 entspannten, entfeuchteten Luft vorbeigeführt wird, ist ein zweiter Kondensator CON2 vorgesehen, durch den die im Kondensator CON1 vorgekühlte Luft in wärmetauschender Weise an der durch die Turbine T2 entspannte Luft vorbeigeführt wird. Die Kondensatoren CON1 und CON2 sind besonders vorteilhaft, wenn Eisfreiheit der klimatisierten Luft gefordert wird. Ansonsten kann auf den Kondensator CON2 auch verzichtet werden, was insbesondere dann erfolgt, wenn ein hoher Wirkungsgrad des Gesamtsystems erzielt werden soll.

Vor Eintritt in der ersten Turbinenstufe entspannten Luft in den Kondensator CON1 ist vorteilhafterweise ein Wasserabscheider WE2 zusätzlich zu dem im Hochdruckwasserabschidekreislauf vorgesehenen Wasserabscheider WE1 vorgesehen. Das abgeschiedene Wasser wird den Stau-luftwärmetauschern MHX/PHX zur dortigen Verdampfung

zugeführt. Vorteilhaft ist der Wasserabscheider WE2 insbesondere bei blockierter Air Cycle Machine ACM, da hier die Wirksamkeit des ersten Wasserabscheiders WE1 stark eingeschränkt ist.

Weiterhin kann durch Öffnung des Economy-Ventils ECV kann der Hochdruckwasserabscheidekreislauf abgeschaltet werden, was insbesondere dann sinnvoll ist, wenn die Air Cycle Machine ACM ausfällt und nicht genug Druck für eine energetisch sinnvolle Nutzung des Hochdruckwasserabscheidekreislaufs zur Verfügung steht. Eine Wasserabscheidung erfolgt dann auf niedrigem Druck durch den Wasserabscheider WE2. Die Kondensatoren CON1 und CON2 sind in diesem Falle funktionslos.

Wie bei dem zuvor beschriebenen Klimatisierungssystem kann die die Turbine T1 und den Verdichter C2 umfassende Maschine insbesondere zum Flugbetrieb abgeschaltet werden, indem das Bypassventil BPV1 geöffnet wird. Durch Öffnung des Bypassventils BPV2 kann auch die Air Cycle Machine ACM, insbesondere bei deren Ausfall, umgangen werden.

In Fig. 2 ist auf der Welle, die die Turbine T1 und den Verdichter C2 miteinander verbindet, in gestrichelter Darstellung ein optionaler Motor M gezeigt, mit dem der Wirkungsgrad des Systems optimiert werden kann. Entweder kann dem System zusätzliche Energie zur Verfügung gestellt werden. Oder und insbesondere kann der Motor aber als Generator genutzt werden, um überschüssige Energie ins Bordnetz zu speisen.

Während das in Fig. 2 dargestellte Klimatisierungssystem insbesondere geeignet ist, um eisfreie klimatisierte Luft zur Verfügung zu stellen, ist in Fig. 3 ein Klimatisierungssystem schematisch dargestellt, das einen besonders günstigen Wirkungsgrad besitzt. Wie in Bezug auf Fig. 4 (Stand der Technik) beschrieben, ist vor der Turbine T1 ein Reheater REH und hinter der Turbine T1 ein Kondensator CON in wärmetauschender Weise zur Durchströmung mit der verdichteten Luft und Kondensierung der darin enthaltenden Feuchtigkeit angeordnet. Der Reheater REH kann grundsätzlich entfallen, ist aber aus den bereits genannten Gründen vorteilhaft. Die Kondensierung der in der verdichteten Luft enthaltenen Feuchtigkeit im Kondensator CON erfolgt im Gegensatz zu dem in Fig. 4 beschriebenen Stand der Technik auf einem vergleichsweise hohen Energieniveau, diese Energie in der Turbine T2 genutzt werden kann, wie dies grundsätzlich in US 5,086,622 vorgeschlagen ist. In US 5,086,622 sind allerdings die Turbinen T1 und T2 gemeinsam mit dem Verdichter C1 und dem Gebläse F auf einer gemeinsamen Welle in einer einzigen Air Cycle Machine ACM angeordnet. Indem erfindungsgemäß die Verdichtung in zwei Stufen aufgeteilt wird und die Turbine T1 mit dem Verdichter C2 sowie die Turbine T2 mit dem Verdichter C1 jeweils getrennte Maschinen bilden, kann der Wirkungsgrad weiter gesteigert werden, weil die Auslegung des Klimatisierungssystems insgesamt variabler ist.

Ähnlich wie in Fig. 2 beschrieben, dienen die Economy-Ventile ECV1 und ECV2 optional zur Umgehung des Hochdruckwasserabscheidekreislaufs. Durch das Öffnen des Bypassventils BPV1 wird die Maschine umfassend die Turbine T1 und den Verdichter C2 im Flugbetrieb umgangen. Das Bypassventil BPV2 dient entsprechend zur Umgehung der Air Cycle Machine ACM bei deren Ausfall. Beide Bypassventile können auch optional als Temperaturregelventile eingesetzt werden. Das Temperaturregelventil TCV2 ist ebenfalls optional, während das Temperaturregelventil TCV4 in dem Klimatisierungssystem vorzugsweise vorgesehen werden sollte. Wie zuvor erwähnt, kann auf den Reheater REH im Grunde auch verzichtet werden. Er ist aber aus den eingangs genannten Gründen vorteilhaft.

Je nach Systemanforderung und/oder zur Vereinfachung des Systems können einzelne Ventile, wie bereits erwähnt, entfallen, oder sie können teilweise zusammengefaßt werden. Insbesondere können zum Beispiel die Ventile ECV1, BPV1 und ECV2 zu einer Leitung mit nur einem Ventil zusammengefaßt werden, so daß sich insgesamt ein weniger komplexes System ergibt. Die Anlage ist dann für den Flugbetrieb mit abgeschalteter Maschine (Turbine T1/Verdichter C2) optimiert.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Aufbereiten von Feuchtigkeit enthaltender, unter Überdruck stehender Luft zur Klimatisierung eines Raums, umfassend die folgenden Schritte:

- Verdichten der unter Überdruck stehenden Luft auf einen höheren Druck,
- Entfeuchten der verdichteten Luft, indem Wasser aus der verdichteten Luft kondensiert und abgeschieden wird,
- Entspannen der entfeuchteten Luft auf einen niedrigeren Druck, und
- Weiterleiten der aufbereiteten Luft zur Klimatisierung eines Raums,

dadurch gekennzeichnet, daß das Verdichten der Luft in separaten ersten und zweiten Verdichtungsstufen erfolgt und beim Entspannen der entfeuchteten Luft Prozessenergie gewonnen wird, die zum Verdichten der Luft in mindestens einer der beiden Verdichtungsstufen regenerativ genutzt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei in der anderen der beiden Verdichtungsstufen prozessfremde Energie zugeführt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei in der anderen der beiden Verdichtungsstufen regenerierte Prozessenergie genutzt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei das Entspannen der Luft in zwei separaten Stufen mittels einer ersten und einer zweiten Turbine erfolgt und die mit der ersten Turbine gewonnene Energie zumindest teilweise in der zweiten Verdichtungsstufe und die mit der zweiten Turbine gewonnene Energie zumindest teilweise in der ersten Verdichtungsstufe, oder umgekehrt, regenerativ genutzt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei nach dem Entspannen der Luft in der ersten Turbinenstufe und vor dem Entspannen der Luft in der zweiten Turbinenstufe Wasser aus der Luft abgeschieden wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 oder 5, wobei beim Schritt des Kondensierens die verdichtete Luft in wärmetauschender Weise an der durch die erste Turbinenstufe entspannten Luft vorbeigeführt und abgekühlt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, wobei der Schritt des Kondensierens zweistufig durchgeführt wird, indem die verdichtete Luft in wärmetauschender Weise auch an der durch die zweite Turbinenstufe entspannten Luft vorbeigeführt und abgekühlt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die Luft in wärmetauschender Weise nach dem Entfeuchten und vor dem Entspannen an der verdichteten Luft vorbeigeführt und erwärmt wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 8, wobei zumindest ein Teil der beim Entspannen in einer der beiden Turbinen gewonnenen Energie in elektrische Energie umgesetzt und abgeführt wird und zumindest ein Teil der beim Entspannen in der anderen der beiden

Turbinen gewonnenen Energie zum Antrieb eines Gebläses (F) genutzt wird.

10. Klimatisierungssystem zum Aufbereiten von Feuchtigkeit enthaltender, unter Überdruck stehender Luft zur Klimatisierung eines Raums, umfassend:

– eine Verdichtereinrichtung (C1, C2) zum Verdichten der unter Überdruck stehenden Luft auf einen höheren Druck,

– einen Kondensator (CON; CON1, CON2) und nachfolgenden Wasserabscheider (WE; WE1, WE2) zum Entfeuchten der verdichteten Luft,

– eine Entspannungseinrichtung (T; T1, T2) zum Entspannen der entfeuchteten Luft auf einen niedrigeren Druck,

– eine Ausgangsleitung zum Weiterleiten der aufbereiteten Luft zur Klimatisierung eines Raums, dadurch gekennzeichnet, daß die Verdichtereinrichtung (C1, C2) zweistufig aufgebaut ist und einen ersten und einen zweiten separat angetriebenen Verdichter (C1 und C2) umfaßt, und die Entspannungseinrichtung eine erste Turbine (T; T1, T2) umfaßt, die mit einem der beiden Verdichter (C1) zum Antrieb desselben gekoppelt ist.

11. Klimatisierungssystem nach Anspruch 10, wobei der andere der beiden Verdichter (C2) mit Fremdenergie (M) angetrieben wird.

12. Klimatisierungssystem nach Anspruch 10, wobei die Entspannungseinrichtung zweistufig ausgebildet ist und eine zweite Turbine (T1) umfaßt, die mit dem anderen der beiden Verdichter (C2) zum Antrieb desselben gekoppelt ist.

13. Klimatisierungssystem nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß ein Wasserabscheider (WE2) zwischen den beiden Turbinen (T1, T2) angeordnet ist.

14. Klimatisierungssystem nach einem der Ansprüche 12 oder 13, wobei ein erster Wärmetauscher (CON; CON1) zwischen den beiden Turbinen (T1, T2) angeordnet ist, durch den in wärmetauschender Weise die verdichtete Luft geleitet und abgekühlt wird.

15. Klimatisierungssystem nach Anspruch 14, wobei ein zweiter Wärmetauscher (CON2) hinter der zweiten Turbine (T2) angeordnet ist, durch den in wärmetauschender Weise die verdichtete Luft geleitet und abgekühlt wird.

16. Klimatisierungssystem nach einem der Ansprüche 10 bis 15, wobei ein zweiter bzw. dritter Wärmetauscher (REH) vor der ersten Turbine angeordnet ist, durch den die entfeuchtete Luft geleitet und aufgewärmt wird.

17. Klimatisierungssystem nach einem der Ansprüche 10 bis 16, wobei eine Bypasseinrichtung (CV2) zur Umgehung des anderen der beiden Verdichter (C2) vorgesehen ist.

18. Klimatisierungssystem nach einem der Ansprüche 12 bis 17, wobei eine Bypasseinrichtung (BPV1) zur Umgehung der ersten Turbine (T1) vorgesehen ist.

19. Klimatisierungssystem nach einem der Ansprüche 10 bis 18, wobei eine Bypasseinrichtung (CV1; BPV2) zur Umgehung des einen der beiden Verdichter (C1) vorgesehen ist.

20. Klimatisierungssystem nach einem der Ansprüche 10 bis 19, wobei ein Generator (M) vorgesehen ist, der mit einer der beiden Turbinen (T1) gekoppelt ist und Energie erzeugt und abführt und wobei ein Gebläse (F) vorgesehen ist, das mit der anderen der beiden Turbi-

nen (T2) gekoppelt ist und von dieser angetrieben wird.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

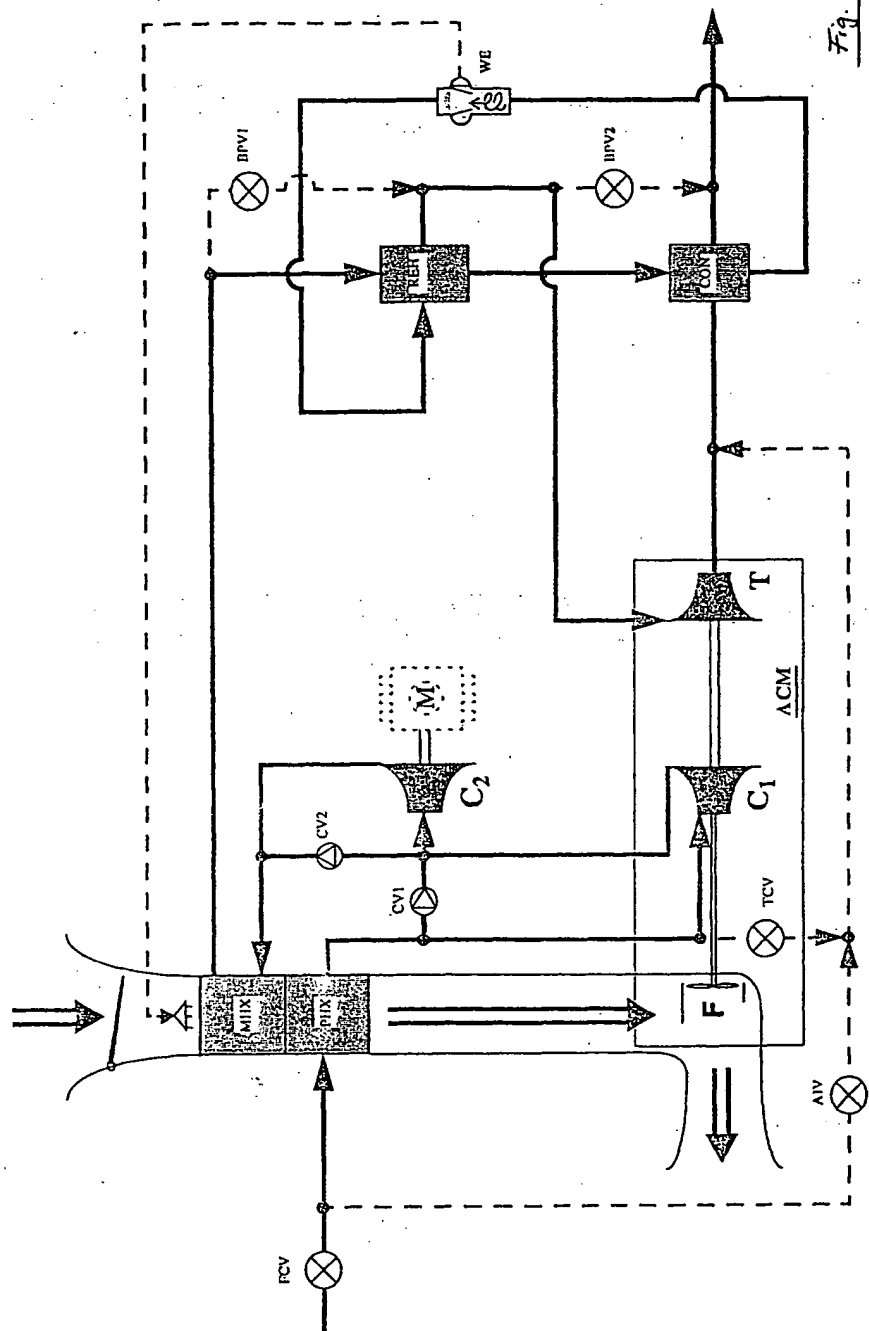


Fig. 1

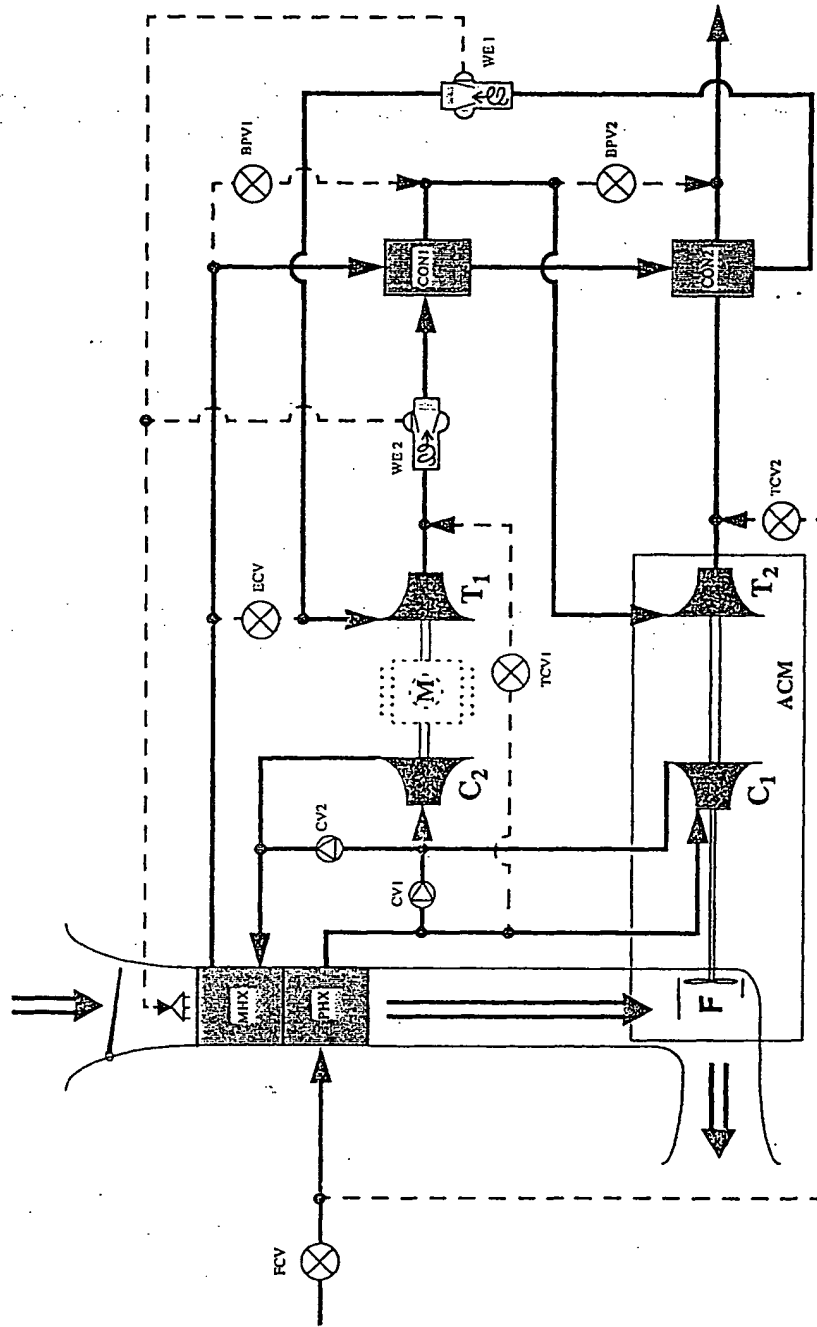


Fig. 2



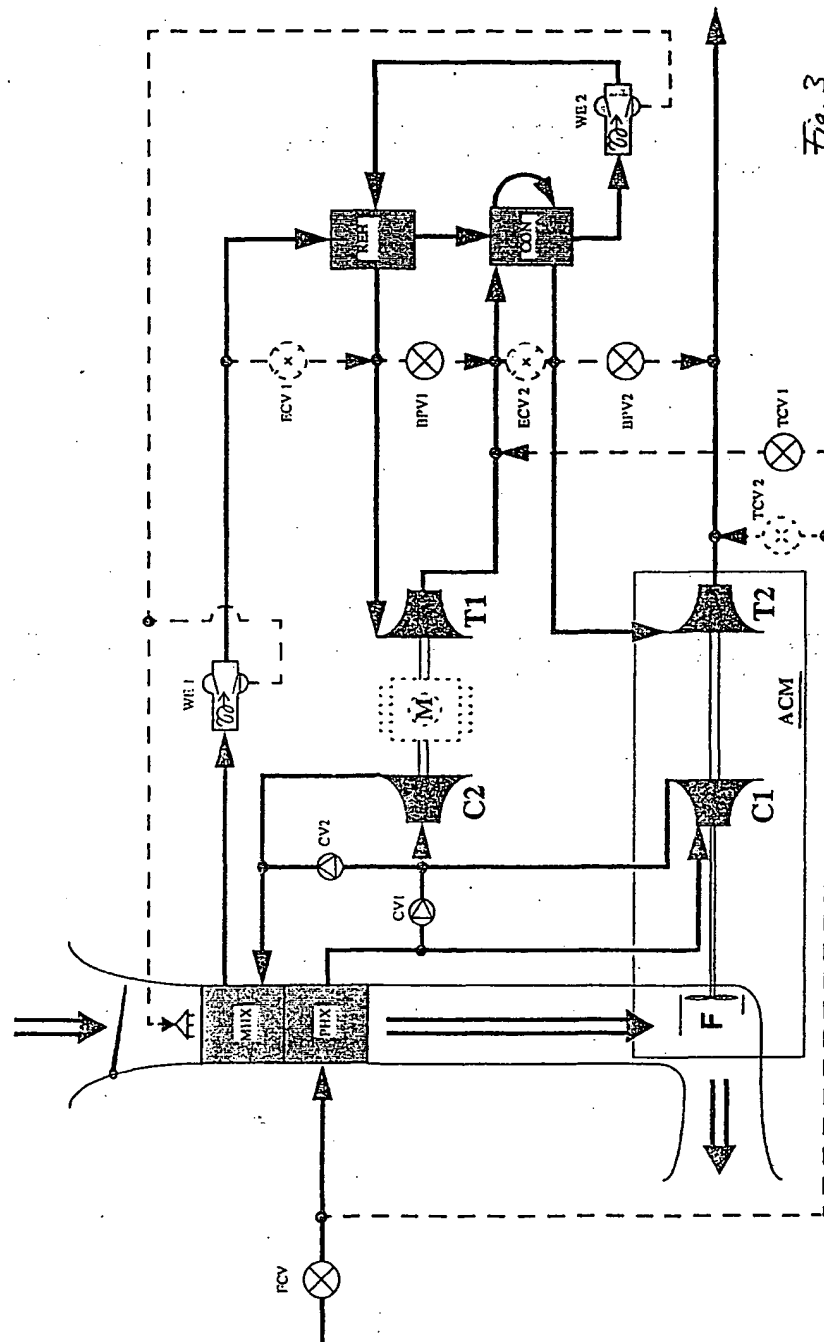


Fig. 3

